

# 无线传感器网络节能路由算法研究

丁海霞

(江苏食品职业技术学院 计算机应用技术系, 江苏 淮安 223003)

**摘要:** 通过对多种类型的无线传感器网络协议的研究, 提出一种基于节点最佳路径移动的无线传感器网络节能路由算法(EEBM)。它通过寻找瓶颈节点、冗余点以及选择最佳节点移动路径的方法, 提高“瓶颈节点”的寿命, 从而延长了整个网络的生命周期。仿真结果表明, EEBM 算法比其他节点移动算法有较大的改进。

**关键词:** 无线传感器网络; 节能路由; 瓶颈节点

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)21-0061-04

## Energy-efficient routing algorithm research based on wireless sensor networks

DING Hai Xia

(Department of Computer Applied Technology, Jiangsu Food Science College, Huaian 223003, China)

**Abstract:** By researching various types of WSN protocols, a WSN energy-efficient routing algorithm (EEBM) based on the best node movement route was presented. It included the way to search for bottleneck nodes and redundant nodes, the way to choose the best node movement route, it improved the lifetime of bottleneck nodes, thereby, prolong the lifetime of wireless sensor networks. Simulation results show that EEBM algorithm has great improved compared with other node mobile algorithm.

**Key words:** WSN; energy-efficient routing; bottleneck nodes

无线传感器网络 WSN(Wireless Sensor Network) 作为新兴的网络测控技术, 是能够自主实现数据采集、融合和传输的智能网络系统, 在军事、交通、数字医疗等领域得到了广泛应用, 因而引起了业界的广泛关注。但是由于 WSN 节点受到体积和成本等方面的限制, 一般采用携带的电池, 能量补充困难而且能量相对较少, 这是目前 WSN 应用的主要问题。因此, 如何降低能耗, 提高整个网络的生命周期是 WSN 的研究热点, 也是亟待解决的问题。

目前, 国内外大量学者针对如何降低和平衡节点能耗问题进行了研究, 本文针对 WSN 路由节能问题进行研究。在 WSN 中, 由于节点特殊原因或节点能量受限等因素影响, 个别节点失效或不能工作状况时有发生。当出现节点失效等情况后, 需要有新的节点及时移动到失效节点的位置, 取代失效节点继续工作。在这个取代的过程中, 节点移动有许多要解决的难题。首先, 节点移动有严格的时间要求。当旧节点剩余能量低于阈值时, 新

节点必须在规定的时间内移动到旧节点位置, 并且越快越好, 从而保证在旧节点失效之前, 新节点能够接替其工作。这样才不会影响 WSN 正常运行, 也不会出现盲区或某一时间无法监测的区域。其次, 节点移动不能影响网络的正常工作, 因为在节点移动的过程中, 节点要与周围节点交换信息, 甚至可能影响节点的中继路由或簇的形成。第三, 由于传感器节点的能量有限, 节点移动消耗能量应尽可能少, 节约传感器节点能源, 从而延长整个传感器网络的有效工作时间。针对这些问题, 本文在总结和应用其他学者研究成果的基础上, 提出了一种基于节点最佳路径移动的无线传感器网络节能路由算法 EEBM (Energy-Efficient routing algorithm based on the Best node Movement route)。

### 1 相关研究

#### 1.1 分层型路由协议

分层型路由协议中, 能量较高节点可用于处理和传递信息, 而能量较低的节点则只能用于对目标进行近似

测量。典型的分层型路由协议主要包括：

(1) 低能耗自适应分簇 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 算法, 它是一种自适应型分簇拓扑算法, 通过让各节点等概率的担任簇头达到相对均衡网络中各节点所消耗的能量的目的。LEACH 是一种以最小化传感器网络能量损耗为目标的分层式协议, 它集成了传感器网络的基本路由协议和拓扑控制算法。在 LEACH 算法中整个网络的通信由一轮一轮的周期性动作组成, 每一轮包括簇的建立阶段和数据通信阶段, 其中簇的建立阶段完成簇的组织, 数据传输阶段将数据传送到簇首, 再由簇首发送到基站 (BS)。

(2) 传感器信息系统的节能型采集方法 PEGAS-IS<sup>[1]</sup>, 它是一种临近最优链式协议, 其基本思想是: 借鉴 LEACH 的动态簇头选举思想<sup>[2]</sup>, 建立一条包含所有节点的最短路径 (称为“链”), 并最终在每轮中只选出一个簇头负责与网关节点通信。由于最短路径链上的节点都能以最小发射功率向邻居节点发送数据, 相比于 LEACH, PEGAS-IS 使网络的生存时间得到显著延长。但是, 由于目前还没有寻找包含所有节点的最短路径的有效方法, PEGAS-IS 不适合在大规模网络上使用。

### 1.2 平面型路由协议

在平面型路由中, 所有节点的地位平等, 典型协议主要有:

(1) 序列分配路由 SAR<sup>[3]</sup>, 其基本原理是: 选择路由时, 综合考虑能量资源、各路径的服务质量 (QoS) 和各信息包的优先权 3 个要素, 根据最终的权值来决定当前的路由。若由于节点故障拓扑逻辑产生变化, 则需要重新计算路由。其中, 基站负责计算拓扑逻辑变化的总量, 并周期性触发路径重新计算。同时, 还采用邻近节点间基于局部路径重建的交换方式恢复路径。

(2) 最小开销前向传递算法 MCFA<sup>[4]</sup>, 其基本原理是: 利用路由传递方向的已知信息 (例如向外部固定基站传递数据) 对数据进行路由。无线传感器节点前向传递的每条信息都被发送到相邻节点中。当节点接收到该信息时, 检查自己是否处于源节点与基站间最小花费路径上。如果是, 则再将信息传递给相邻节点。不断重复该过程, 直至该信息被传递到基站中。在 MCFA 中, 各节点需要了解从本节点到基站间的预计最小花费路径, 节点无需包含特有 ID 或维护路由表。另外, 各节点也不断修正自己到基站的最低花费值。

### 1.3 适应型路由

信息协商传感器协议 (SPIN)<sup>[5]</sup> 是适应型路由的典型协议, 可通过控制特定的系统参数以适应网络当前条件和可用的能量水平。

通过对典型节能路由模型的研究可以看出, 针对 WSN 能耗的研究主要集中在路由和网络的建立、节点分簇、簇头选取、轮询策略等方面, 而通过策略选取节

点, 将其移动到指定区域来取代失效节点, 完成类似移动 Internet 或 3G/4G 的移动服务等方面的研究还相对较少。

## 2 基于节点最佳路径移动的 WSN 节能路由算法 EEBM

### 2.1 基本思想

EEBM 主要研究当“瓶颈节点”即将发生失效等情况时, 如何在满足节约节点移动消耗能量等多条件约束情况下, 找到最佳的移动节点 (优先考虑移动独立冗余节点) 和移动路径, 从而保证网络的正常工作, 延长网络的有效工作方法。

算法的主要思想如下:

(1) 网络中独立冗余节点的选取策略。所谓独立冗余节点, 即若关闭该节点, 不会影响网络的覆盖率。以下通过 Voronoi 划分与 Delaunay 三角剖分来确定网络中的独立冗余节点<sup>[6]</sup>。

(2) 网络中“瓶颈节点”的选取。所谓“瓶颈节点”, 即在一个随机部署的 WSN 中, 那些由于它们的失效而造成整个网络被割裂成两个或多个不相连的区域, 并且由于收集数据的基站和检测目标不在同一个区域内, 造成整个网络生命期结束的最少数目的节点。直观地说, 如果瓶颈节点消亡, 则整个 WSN 的生命就结束。参考文献 [7] 就是在全局范围内找出限制网络寿命的“瓶颈节点”。

(3) 节点移动最佳路径选择。在前面两部分的基础上, 选取合适的独立冗余节点进行移动, 将其移动到“瓶颈节点”的周围, 有两个约束条件: 不破坏网络原有的覆盖率以及移动损耗能量最少。在满足基本网络覆盖率的情况下, 使得“瓶颈节点”周围有备用的节点, 备用节点可以与“瓶颈节点”协同工作或失效的“瓶颈节点”替换。

(4) 移动完毕后, 网关节点会监听“瓶颈节点”发出的信息, 一旦该“瓶颈节点”的剩余能量低于阈值, 则移动到其附近的节点会被唤醒, 取代失效节点, 从而使网络正常工作。

### 2.2 相关概念

假设一个 WSN 包含一组节点  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ , 其中  $n$  为网络内节点数量,  $n$  个节点部署到一个监测区域 MA 网络内通常存在一个基站节点 BS 来实现信息汇聚以及与外界通信, 正常的网络节点采用多跳方式与 BS 通信, 将感知数据传送到需要的地方。假设:

(1) 节点  $x_i$  可采用 GPS 或其他方式获取自己的位置;

(2) 节点  $x_i$  的感知半径为  $R_{si}$  和感知区域为  $A_{si}$ , 节点  $x_i$  的通信半径为  $R_{ci}$ ;

(3) 整个网络的感知区域  $A = \bigcup_{i \in [1, n]} A_{si}$ 。

根据假设可知, 当任意一个节点  $x_j$  的感知区域完全

被其他节点覆盖,即  $A = \bigcup_{\substack{i \in [1, n] \\ i \neq j}} A_{si}$ , 那么节点  $x_j$  为冗余节点。

### 2.3 寻找“瓶颈节点”的方法

“瓶颈节点”具有如下特点:

(1)“瓶颈节点”是两个或多个 WSN 区域通信的唯一路径,承担着繁重的中继任务。

(2)“瓶颈节点”的能耗要大大高于普通节点乃至基站节点,这就造成了节点的能耗差异较大和不均匀性。

(3)“瓶颈节点”失效意味着部分通信中断、整个网络失效或者部分失效(参考文献[7]对此也有专门的讨论)。针对上述特点,综合 KARGER 等人提出的 MINCUT 算法<sup>[8]</sup>,借鉴开放最短路径优先 OSPF(Open Shortest Path First)<sup>[9]</sup>中的探测协议,提出基于消息交换的瓶颈节点定位算法。

算法的具体思想为:(1)节点发送报文到邻居节点,邻居节点以消息确认形式反馈;(2)节点通过消息交换获得邻居节点信息,生成拓扑结构,判断是否为瓶颈节点。

### 2.4 EEBM 算法的实现

经过 2.3 的研究,能够得到所有的独立冗余节点及网络中制约使用寿命的“瓶颈节点”,以下将在这些工作的基础上,在不破坏网络连通性和覆盖率以及最小化能量消耗的前提下,完成节点移动的任务,使得“瓶颈节点”周围有备用的节点。

#### 2.4.1 节点直接移动

由 2.2 及 2.3 可以得到所有独立冗余节点的集合  $S$  和网络中的“瓶颈节点”,节点直接移动算法的具体步骤为:(1)从独立冗余节点集合  $S$  中选出可以移动的节点;(2)分别计算每个可移动节点移动时所消耗的能量及其剩余能量,并进行综合评估,找到消耗能量少且剩余能量多的移动策略。但是,有时候消耗能量最小和剩余能量最大两个最优不会同时达到,所以需要对这两个代价进行折中;(3)向该节点发出命令信号,命令其向指定位置移动。

#### 2.4.2 节点最佳路径移动

节点直接移动方法的优点是算法简单、效率高,但仍存在着较大的缺陷。例如,当可移动节点离指定位置较远时,移动该节点会耗费较多能量,其移动后的剩余能量会很小,若此时采用节点直接移动算法,效果很差,因此以下给出采用节点最佳路径移动的方法。该方法是在保证连通性和覆盖率的情况下,逐步移动多个节点,使得最后移动到“瓶颈节点”周围的替补节点的剩余能量相对较高,使用寿命也会更长。

节点最佳路径移动的具体步骤如下:

##### (1)寻找中介节点的算法

当 WSN 中产生失效节点时,需要有新的节点移动到失效节点位置代替失效节点继续工作。

假设  $x_0$  为失效节点,  $x_i$  为冗余节点,则可以将节点  $x_i$

移动到节点  $x_0$  的位置,或者不直接将节点  $x_i$  移动到  $x_0$ ,而是寻找节点  $x_0$  与节点  $x_i$  之间的中介节点,产生多条节点移动路径,如图 1 所示。

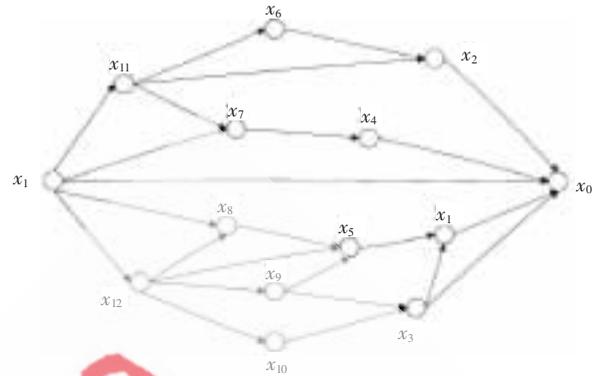


图 1  $x_0$  到  $x_i$  之间的多条节点移动路径

设  $t_i$  为节点失效后新节点  $x_i$  移动到失效节点处所需时间;  $T_i$  为节点  $x_i$  离开时间;  $S_i$  为第  $i$  条路径中介节点圆区域内节点分布密度和,  $n_i$  为第  $i$  条路径中介节点数目,  $p_i$  为第  $i$  条路径节点密度, 则  $p_i = \frac{S_i}{n_i}$ 。

如果节点  $x_i$  可以移动到节点  $x_j$  处,则必须满足不等式:

$$\frac{d_{ij}}{v} - (t_i - t_j) \leq T_i$$

其中,  $d_{ij}$  为节点  $x_i$  与节点  $x_j$  的距离,  $v$  为节点移动速度。

用此方法可以找出  $x_0$  与  $x_i$  之间的多个中介节点,从而得到多条移动路径,如图 1 所示。并且计算每个中介节点圆区域内的节点分布密度、每个路径的路径节点密度、总体消耗能量和中介节点移动后的最小剩余能量。

##### (2)选择最佳移动路径

选择最佳路径的原则是:该路径总体消耗能量最小,该路径节点移动后的剩余能量最大以及该路径节点密度最大。一般情况下,不可能同时满足上述三个原则,于是应用层次分析法解决该问题。

层次分析法是数学建模中常用的用于决策的方法。在深入分析实际问题的基础上,将有关的各个因素按照不同属性自上而下地分解成若干层次。同一层的诸因素从属于上一层的因素或对上层因素有影响,同时又支配下一层的因素或受到下层因素的作用。最上层为目标层,通常只有 1 个因素,最下层通常为方案或对象层,中间可以有 1 个或多个层次,通常为准则或指标层。本文中目标层为选择最佳路径,准则层有 3 个因素分别是总体消耗能量最小、移动后节点最小剩余能量最大和路径节点密度最大,方案层为若干条后选路径,如图 2 所示(假设有 3 条候选路径)。

### 2.4.3 仿真及结果分析

仿真环境如下:无线传感器节点随机分布在  $40 \times 40$

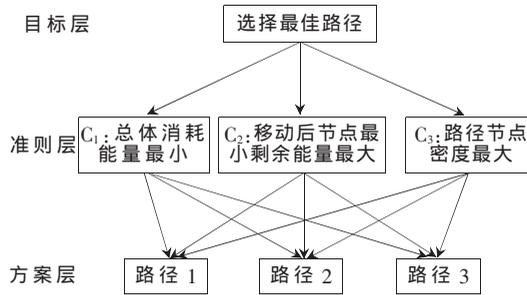


图2 选择最佳节点移动路径的层次结构

的平面正方形区域中,节点数目为48个,每个节点的初始能量 $E=2000\text{ J}$ ,节点移动速度 $V=1\text{ m/s}$ ,恢复时间 $T=10\text{ s}$ ,节点移动 $1\text{ m}$ 消耗的能量为 $30\text{ J}$ ,节点的传感半径 $R=6$ ,传感器的类型参数 $\alpha=0.1, \beta=3$ 进行仿真。节点移动前后瓶颈节点能耗对比如图3所示。

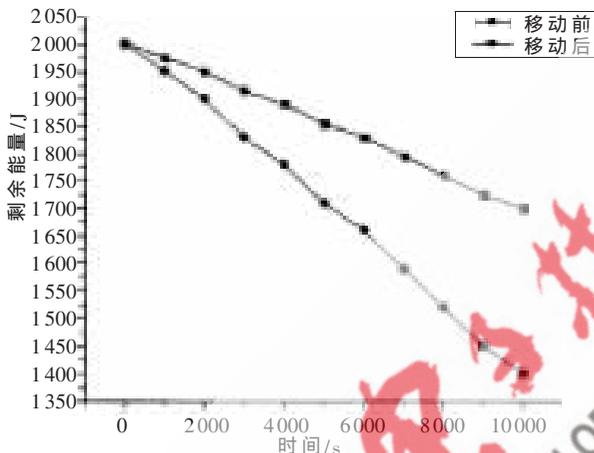


图3 移动一个节点前后瓶颈节点能量消耗示意图

假设节点平均接收一次信号消耗的能量为 $0.5\text{ J}$ ,发送一次信号的能量为 $0.7\text{ J}$ ,并且瓶颈节点每 $10\text{ s}$ 周期性地发送或接收信号,其余节点处于休眠状态。对下面两种情况进行仿真:(1)不移动任何节点;(2)将离瓶颈节点较近的冗余节点移动到瓶颈节点的位置,共同分担信号的接收和发送工作。仿真结果如图3所示。

从图3可以发现,瓶颈节点有了支援节点后,其消耗的能量明显地减少,即瓶颈节点的寿命有所延长,从而延长了整个网络的有效寿命。

本文对WSN中基于节点移动的节能路由问题进行了有针对性的研究,提出了利用冗余节点最佳移动路径算法来解决“瓶颈节点”能量消耗过快的问题,形成了移动后的冗余节点与“瓶颈节点”协同工作,分担通信负荷,提高“瓶颈节点”寿命的新型节能路由算法——EEBM。该算法考虑了节点移动消耗能量、节点剩余能量和节点分布密度等因素,运用层次分析法,能够在多条件约束情况下找到最佳的移动节点和移动路径,从而保证在节点覆盖不受影响的条件下网络仍能正常工作,并且延长整个传感器网络的有效工作时间。仿真证明,在存在瓶颈节点的WSN中,EEBM算法相比其他节点移动

算法确有较大的改进。

#### 参考文献

- [1] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems[C]. Proceeding of the IEEE Aerospace Conference. Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2002: 1125-1130.
  - [2] YE M, LI C F, CHEN G H, et al. EECS: An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks [C]. Proceeding of the IEEE Int'l Performance Computing and Communications Conference. New York: IEEE Press, 2005: 535-540.
  - [3] SOHRABI K, GAO J, AILAWADHI V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network [J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 16-27.
  - [4] YE F, CHEN A, LIU S, et al. A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks [C]. Proceeding of the tenth International Conference on Computer Communications and Networks(ICCCN)2001, 2001: 304-309.
  - [5] HEINZELMAN W R, KULIK J, BALAKRISHNAN H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks [C]. In: Proceeding of the ACM MobiCom'99. Seattle: ACM Press, 1999: 174-185.
  - [6] 马震,刘云.一种无线传感器网络的能耗平衡覆盖模型[J].北京:北京交通大学学报.
  - [7] 田乐,谢东亮.无线传感器网络中瓶颈节点的研究[J].软件学报,2006,17(4): 830-837.
  - [8] CHEKURI C S, GOLDBERG V A, KARGER D R. Experimental study of minimum cut algorithms [C]. Proceedings of the eighth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, New Orleans, Louisiana, United States, January, 1997: 324-333.
  - [9] MOY J T. OSPF anatomy of an internet routing protocol. Addison-Wesley, 1998.
  - [10] 李成法,陈贵海,叶慰,等.一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J].计算机学报,2007,30(1):27-36.
- (收稿日期:2010-07-03)

#### 作者简介:

丁海霞,女,1975年生,讲师,主要研究方向:计算机应用技术、计算机网络技术研究。